



# 深海用超音波圧電トランスジューサアレーに関する研究

著者	鎌田 弘志
号	1229
発行年	1991
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10036">http://hdl.handle.net/10097/10036</a>

氏 名	鎌 田 弘 志
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 3 年 10 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 47 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	深海用超音波圧電トランスジューサアレーに関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中鉢 憲賢    東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 信良

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

近年、水中超音波映像の技術が急速に発展しているものの、我が国近辺に多い極めて深々度の海域において使用できる水中超音波映像機器はこれまで存在しなかった。その最大の理由は、深海での水圧に十分耐え安定に作動する水中超音波トランスジューサアレーの技術が開発されていなかったことにある。

その技術の開発において、第 1 に重要な課題は副極の抑制された所望の指向性合成を実現する開口波源分布の条件を決定することである。第 2 の課題はその理論的な設計どおりの特性を有する波長がミリメートルオーダーのミリ波帯超音波用のアレーを開発することである。第 3 の課題は必要な深度の水圧下で安定に作動する構造を開発することである。特に、深海で安定に作動する構造の開発はこれまでに人類が経験したことのない全く新しい技術課題である。

第 1 の課題は、個々のエレメントの感度や配列位置のばらつきなどによってアレーの開口波源分布が乱れ、所望の副極抑制がなされないという問題を解決することである。副極を十分に抑制するには、許容し得る指向性歪み成分の量からアレーの開口波源分布の条件を決める必要がある。この課題に関連した研究は古くから見受けられるが、指向性の歪み成分を決定する諸要因を多変量の同時発生プロセスとして扱う総合的な見地からの解析ではなかった。

第 2 の課題は、所望の特性を発揮する超音波圧電トランスジューサアレーを実現するということである。波長の短いミリ波帯用のアレーは一部を切り残してダイシングした圧電振動子すなわちダ

イス化圧電振動子を利用すれば均一で配列精度の高いアレーが実現できる。この技術の水中超音波トランスジューサへの応用は我が国では筆者が1976年に最初に取り上げたが、当時は、ダイシングピッチやダイシング深さなどを簡単な考え方に基づいて決定しており、理論的に詳しい検討はされていなかった。

第3の課題は耐水圧性である。ミリ波帯用超音波トランスジューサではキルクゴムなどでバックシングしたものが一般的であるが、このようなバックシング材料は水圧で圧縮し、強度的に耐えられず結局は破壊に至ることになる。また、音響インピーダンスも水圧で変化するから、深さとともに遮音性が失われてくる。結局、これまでの研究においては、深々度の水圧で圧縮破壊を起こすことなく後方遮音性に優れたバックシング方法が取り上げられていなかった。

そこで、本研究で深海用超音波圧電トランスジューサアレーに関する上述の3つの課題について詳しく検討し、その解決方法と技術を確立し、具体的に、実用的な深海用超音波圧電トランスジューサアレーを製作し、世界一の最大潜航深度をもつ6500m級深海調査船「しんかい6500」に搭載するための水中超音波映像ソナーを実現した。

## 第2章 副極抑制のためのアレーエレメントの管理限界

この章では、第1の課題である超音波トランスジューサアレーの指向性の副極抑制を効果的に実現するために、副極値を上昇させる諸要因を多変量の同時発生プロセスとして総合的に要因解析し、その管理限界を明らかにした。

まず、指向性歪みパワーの一般式を導き出し、歪みパワー成分にはレエメント欠損や感度振幅及び位相のばらつきによるもの、エレメント間漏話の平均値によるもの、漏話のばらつきによるものの3種類があることを見いだした。それらのうち、エレメント欠損並びに感度の振幅及び位相の3変量のばらつきによるものが最も支配的で、工程品質上、なかでも感度の振幅及び位相のばらつきの管理が最も重要であることが分かった。

次に、そのばらつきの管理限界について解析し、シミュレーション及び実測値との対比を行った。その結果、エレメントの感度の振幅及び位相のばらつきの管理をするにあたり、従来のように確率副極の平均値を基準として考えるのは適切ではなく、95%管理限界を上部管理限界と考えて管理する方法が有効であることが分かった。さらに、この振幅と位相のばらつきを許容偏差内に抑えるために振動子の物理定数などの細部諸要因への誤差配分を行って、その管理限界を明確にした。

次に、非ランダムな誤差について検討した。まず、相互放射インピーダンスの考えをもとに、音場を介したエレメント間の相互干渉による感度変化分を表す係数として配列干渉係数を定義し、それに基づきエレメントを半波長よりも大きい有指向性のエレメントとすることが相互干渉を防ぐ一つの解であることを見いだした。また、デジタル的な振幅・位相制御によって発生する量子化誤差の指向性に及ぼす影響を複素フーリエ変換の考えをもとに考察し、4ビットの量子化で量子化誤差による副極値を-20dB以下にできることが分かった。

### 第3章 ダイス化圧電振動子によるアレー構成：角柱振動子モデルを用いたダイシングピッチの設計

この章と次章では、第2の課題であるアレーの具体化としてダイス化圧電振動子によるアレー構成を取り上げた。まずこの章ではダイシングピッチの条件について解析を行った。解析にあたって、ダイス化圧電振動子を直方体の圧電振動子の集まりとして溝を100%入れた状態で考え、直方体の圧電振動子の幅と厚さの寸法比が振動モードにどう関係するかという問題に帰着させて検討した。

まず、清水の3次元結合圧電振動子の等価回路の考え方に基づき、受波感度の3次元結合感度特性及び電気アドミタンスの式を導き出し、それをもとに振動の結合度を示す反共振結合度及び共振結合度を定義した。その縦効果長さモード共振結合度を90%以上とする条件を求めたところ幅／厚さ $\leq 0.6$ が必要であることが分かった。この条件は有限要素法を用いた研究例の結果と一致するもので、簡単な式で同じ結果が求められたことは産業の現場における設計効率の面において極めて有意義な結果であるといえる。

さらに、受波感度との結合度を示す定量的な基準として縦効果長さモード感度結合度を定義し、それを90%以上とするための寸法条件を求めたところ、これまでの考え方に比べても最も小さい幅／厚さ $\leq 0.5$ という寸法比が必要であるということが分かった。

### 第4章 ダイス化圧電振動子によるアレー構成：2層構造モデルを用いたダイシング深さの設計

この章ではダイス化圧電振動子のダイシング深さの条件について解析を行った。均一な配列位置精度を実現するためには一部を切り残して振動子の柱を加工前と同一面内に維持することが必要である。解析にあたって、ダイシング溝の入った部分を細長い棒状の圧電振動子の集まりと、切り残し部分を板状の圧電振動子と考えて、その2種の圧電振動子の積層構造として取り扱い、ダイシング深さの条件の問題を2層構造の圧電振動子が第1層のみの圧電振動子とみなせる条件を求めることに帰着させて検討した。

まず、菊池、中鉢らが用いてきた圧電振動子の1次元等価伝送線路モデル（本論文でNKC等価回路と名付けた。）による多層構造の解析手法を利用し、受波感度及び電気アドミタンスの式を導き出し、それをもとに2層構造の層の厚さの比と周波数定数の変化の関係を求めた。その結果、溝の深さ／全体の厚さ $\geq 0.7 \sim 0.8$ であればダイス化圧電振動子の周波数定数はほぼ棒状縦効果長さモードの周波数定数に近づくことが分かった。

さらに、第2層の圧電h定数が全体の受波感度に影響する度合いを示す基準として第2層感度結合度を定義し、それをもとに2層構造の圧電振動子が第1層のみの圧電振動子とみなせる条件を求めた。その結果、溝の深さ／全体の厚さ $\geq 0.75$ とすれば第2層感度結合度は10%以下となることが分かった。

### 第5章 超音波圧電トランスジューサアレーの高耐水圧化

この章においては、第3の課題であり、かつ本研究の最終目的である深海での応用をめざしたア

レーの高耐水圧化について検討を行った。

特殊な材料を開発して利用するのではなく、容易に入手でき強度的にも音響的にもよく知られた通常の材料であるウレタンゴムとステンレス鋼とを組み合わせで2層構造とし、海水と同等以上の固さで層構造全体として音響インピーダンスの低いバックキングを行い、深海において水圧による圧縮破壊を起こすことなく、後方遮音性に優れた超音波圧電トランスジューサアレーを実現した。

まず、音響不整合層があるときのトランスジューサをNKC等価回路を用いて解析し、受波感度の前後比は後方入射音に対する解放伝送係数で近似できることを明らかにした。次に、リチャーズの鍵定理を応用して2層構造の音響不整合層を決定した。決定した構造のトランスジューサを試作評価したところ、その前後比が20dB以上と理論的に予想した通りの性能が実現された。

次に、従来実施例のなかった耐水圧タンク内での相互校正法を用いて深々度の水圧下での感度を測定した。その結果、この構造のトランスジューサが6500mにも至る深海に相当する高水圧下においても常圧下の感度に比してわずかに1～2 dB低下するにすぎない安定した性能を示すことが分かった。

## 第6章 高耐水圧化超音波圧電トランスジューサアレーの実用化

この章では前章までの成果を踏まえて、潜水調査船「しんかい6500」に装備する水中超音波映像ソナーへの実用化について述べた。

この水中超音波映像ソナーは周波数300kHzで用いられ、そのトランスジューサアレーは、48チャンネルの送波リニアアレーと64チャンネルの受波リニアアレーを直交させたクロスリニアアレーであり、第3章、第4章で明らかにした条件でダイシングしたダイス化圧電振動子を、第5章で検討した2層構造の音響不整合層でバックキングしたものである。その耐水圧は深海調査船の最大潜航深度6500m相当の水圧の1.5倍以上あることを確認した。

この水中超音波映像ソナーを用いて合成指向性の評価を行った結果、得られた指向性の最大副極値は目標とした-20dBをわずかに1～2 dB上回っているにすぎず、第2章で論じた95%管理限界の考え方とほぼ合致するものであった。

## 第7章 結 論

本研究によって得られた成果と今後の課題について総括した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

世界最大潜航深度の潜水調査船「しんかい6500」の開発にあたって、それに搭載する実用的な水中超音波映像機器の開発が強く望まれていたが、著者は高水圧に十分耐え、安定に動作する水中超音波トランスジューサアレーの研究開発とその実用化に成功した。すなわち、アレーの指向性副極抑制のための各種要因について設計製作のための管理限界を明らかにし、それを満足する実用的なダイス化圧電振動子校正を提案するとともに、後方遮音に優れた高耐水圧バックングの新しい構造を開発して、高水圧用の実用的なアレーの製作に成功した。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、アレーの指向性について、副極抑制を効果的に実現するために、副極値を上昇させる各種要因が同時に発生するランダムプロセスとして総合的に解析し、シミュレーション及び実測データとの対比を行い、その管理限界を明らかにしている。

第3章と第4章は、アレーの具体化に関する研究で、ダイス化圧電振動子によるアレー構成を提案している。等価回路解析をもとに感度結合度を定義し、第3章ではダイシングピッチの条件を、第4章ではダイシング深さの条件を明らかにし、具体的な設計指針を与えている。これは有用な知見である。

第5章は、アレーの高耐水圧の研究で、非圧縮性の材料を組み合わせた2層構造の音響不整合層バックングを開発し、また等価伝送線路解析により振動子の材料と寸法を決定し、高水圧下で後方遮音性に優れたアレーを実現している。このアレーの高水圧下における性能を高圧タンク内において相互校正法により評価している。

第6章では前章までの成果を踏まえて潜水調査船「しんかい6500」に装備した実用的な水中超音波映像ソナーの総合特性について述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、これまでになかった深海用の水中超音波トランスジューサアレーの開発に関して、理論的、実験的に種々の問題を解決し、新しいダイス化圧電振動子アレーの作成技術を確立し、実用化に成功したもので通信工学及び超音波工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。